

## ОТЗЫВ

на автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора физико-математических наук «Управляемая перестройка поверхности кристаллических подложек для формирования эпитаксиальных наноструктур» МУСЛИМОВА АРСЕНА ЭМИРБЕГОВИЧА, специальность 01.04.18 – «Кристаллография, физика кристаллов»

Диссертация Муслимова А.Э. посвящена актуальной теме развития методов роста тонких функциональных эпитаксиальных слоев различных металлов, полупроводников и диэлектриков на кристаллических подложках синтетического сапфира  $Al_2O_3$ , пентаоксида ванадия  $V_2O_5$ , карбида кремния  $SiC$  и триглицинсульфата различной кристаллографической ориентации. Такие кристаллы широко применяются в современных технологиях микро- и нанoeлектронники. Глубокое изучение процессов формирования эпитаксиальных полупроводниковых, диэлектрических, магнитных и других функциональных гетероструктур и исследование их физических свойств крайне необходимо для развития нанотехнологий и нанoeлектроники. Целенаправленное модифицирование поверхности кристаллических подложек, а также варьирование величины и знака механических напряжений на границе раздела сопрягающихся решеток позволяет контролировать процесс формирования эпитаксиальных гетероструктур с заданными свойствами.

Для исследования структуры полученных в диссертации гетероструктур использованы современные методы зондовой и растровой электронной микроскопии высокого разрешения. Изучены твердофазные реакции и твердофазная рекристаллизация поверхности кристаллических подложек в процессе высокотемпературного отжига на воздухе и в условиях вакуума. При этом особое внимание уделено исследованию подложек с периодическим рельефом высотой более 1 нм для нанесения эпитаксиальных пленок полупроводниковых материалов при сравнительно большом несоответствии параметров решеток.

К наиболее важным результатам диссертационной работы Муслимова А.Э. можно отнести следующие:

1. Изучены и описаны процессы твердофазной рекристаллизации в приповерхностных слоях подложек сапфира разной ориентации в зависимости от условий обработки и отклонения вихриальной поверхности от сингулярной грани.

2. Впервые продемонстрирована возможность целенаправленного модифицирования электрофизических свойств поверхности подложек сапфира, способствующих эпитаксиальному разрастанию осажденного вещества. Установлено, что знак заряда поверхности не влияет на зародышеобразование, а определяет скорость диффузионных процессов. Отрицательный заряд способствует более высокой подвижности адатомов и образованию, в итоге, сплошной эпитаксиальной пленки.

3. Показано, что наличие террасно-ступенчатой наноструктуры поверхности подложек сапфира способствует гетерозэпитаксиальному росту слоя, даже при значительном несоответствии параметров решетки на границе раздела (до 18 %). На примере эпитаксиальных пленок  $AlN$ ,  $ZnO$ ,  $CdTe$ ,  $Au$  подтверждено, что ступени являются областями стока диффундирующих вдоль поверхности адатомов и предпочтительны в качестве центров гетерогенного зародышеобразования. Предложена методика роста эпитаксиальных пленок  $AlN$  на сапфире прямой высокотемпературной нитридизацией предварительно нанесенных слоев алюминия посредством твердофазных химических реакций.

4. Предложена методика формирования напряженных монокристаллических, поликристаллических и аморфных пленок ферритов кобальта и никеля, путем твердофазного синтеза, с целью управления их магнитными свойствами. Разработана методика твердофазного синтеза дискретных нанокристаллов феррита висмута.

Диссертационная работа Муслимова А.Э. имеет значительное практическое значение для развития технологий микро- и нанoeлектроники, спинтроники.

Разработанная методика формирования эпитаксиальных пленок  $ZnO$  на подложках сапфира с буферными слоями золота с контролируемой морфологией поверхности может найти применение в технологии формирования сенсорных устройств. Предложенная



методика формирования покрытий золота на подложке сапфира, в оптических спектрах поглощения которых наблюдаются плазмонные особенности, перспективна в оптоэлектронике и технологии изготовления сенсорных устройств. Разработанные основы твердофазного синтеза пленок ферритов никеля и кобальта различного структурного совершенства позволяют изменять магнитные свойства пленок с учетом напряжений и магнитострикционных эффектов в широком диапазоне величин. Такие структуры могут быть востребованы в области бионанотехнологий. Разработанная методика формирования гетероструктур на основе оксидов ванадия с заданными свойствами в приповерхностных слоях сколов (001) кристалла пентаоксидаванадия  $V_2O_5$  с использованием процессов твердофазных превращений перспективна в микроэлектронике. Новый способ повышения олеофобности поверхности сапфировых пластин может использоваться в технологии производства стойких к органическим загрязнителям защитных прозрачных стекол в оптических устройствах.

В качестве критического замечания следует обратить внимание на то, что, к сожалению, в автореферате не приведены критерии «тонкости» получаемых эпитаксиальных пленок, в особенности в соотношении с линейными размерами островков и минимальной толщиной получаемых сплошных пленок. В главе 3, разделах 3.1-3.7 рассматриваются пленки оксидов и нитридов толщиной до 200 нм, при этом их шероховатость составляет 1-5 нм, а в разделе 3.8 обсуждаются пленки золота толщиной порядка 2 нм. С учетом характерных размеров ступенек подложек 10-40 нм, свойства получаемых структур могут кардинально отличаться в зависимости от толщины пленок и степени их сплошности. При достаточно малой толщине пленок существенное значение имеют квантово-размерные эффекты. Было бы целесообразно обратить внимание на соотношение длины квантовой когерентности и толщины получаемых полупроводниковых и магнитных пленок.

В то же время, в диссертации изучены и более толстые пленки, как например  $ZnO/AlN$  толщиной порядка 1 мкм, для применений в акустоэлектронике. Для них размерное квантование не существенно. Поэтому приведенное выше замечание не умаляет общее научное и практическое значение диссертации Муслимова А.Э.

Содержание автореферата диссертации Муслимова А.Э. достаточно полно отражает объем и результаты выполненного научного исследования.

В целом диссертация Муслимова А.Э. отвечает всем требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям согласно п. 9 Положения о присуждении ученых степеней ВАК РФ, а ее автор – Муслимов Арсен Эмирбегович заслуживает присуждения искомой ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.18 – «Кристаллография, физика кристаллов».

Главный научный сотрудник ФГБНУ "Технологический институт сверхтвёрдых и новых углеродных материалов"

адрес: 142190, г. Москва, Троицк, ул. Центральная, д. 7а

тел. +7 (499) 400-62-25, email: info@tisnum.ru

доктор физ.-мат. наук (специальность 01.04.07),

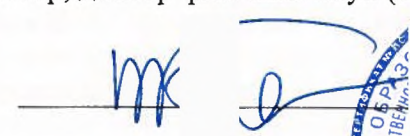
Согласен на обработку персональных данных.



Буга Сергей Геннадьевич

Директор ФГБНУ "Технологический институт сверхтвёрдых и новых углеродных материалов"

Профессор, доктор физ.-мат. наук (специальность 01.04.07),



Бланк Владимир Давидович

« 20 »

09

